

Martin WÜNSCHE¹

**VYUŽITÍ MKP K MODELOVÁNÍ STROPNÍCH KONSTRUKCÍ
PŘI CYKICKÉM ZATĚŽOVÁNÍ**

USING FEM TO MODELLING OF CEILING STRUCTURES UNDER CYCLIC LOADING

Abstrakt

Pro účely studie chování dřevěných konstrukcí při cyklickém zatížení byla provedena počítačová analýza u jednoho typu stropní konstrukce. Úloha byla brána jako parametrický problém, kde parametrem byla tloušťka záklopu a tuhost spojovacích elementů. Výsledky poskytují informace o tuhosti v rovině stropu a smykové tuhosti spojovacích prostředků. Tato simulace může sloužit jako měřítko modelu pro stanovení napětí a identifikace mechanických vlastností.

Klíčová slova

Cyklický test, dřevěný strop, disipace energie.

Abstract

For the purposes of wooden ceilings behaviour a numerical analysis was performed by the one type of a wooden floor with the single planking. The results provide information about in-plane stiffness of the floors and the shear stiffness of elements substituting the nail joints. It serves as a benchmark model used in the stress calculation and identification of the mechanical properties.

Keywords

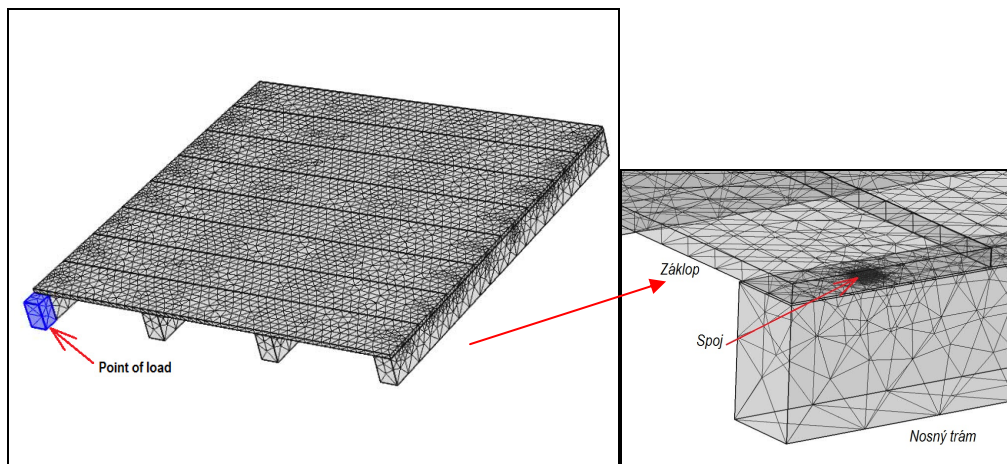
Cyclic test, Wood ceiling, Energy dissipation.

1 ÚVOD

Analýza se soustředila na parametrické zkoumání mechanických vlastností dřevěného trámového stropu se záklopem, který byl orientován kolmo k nosným trámům. Parametrizace spočívala v definování jednotlivých tlouštěk bednění od 14 do 30 mm. Zvolený interval tlouštěk se vztahoval na velké množství historických dřevěných stropů. Zkoumaný typ stropní konstrukce zaujímá významné místo v historickém vývoji stropních konstrukcí. Jednalo se o nejběžnější typ stropní konstrukce před vynálezem železového betonu. Stropní konstrukce se vyznačuje nízkou hmotností a dobrým poměrem únosnost / hmotnost.

Geometrie počítačového modelu se skládala ze čtyř trámů, na které byl přichycen záklop v jedné vrstvě v orientaci pod úhlem 90° vůči nosným trámům. Tento model a jeho modifikace předpokládala stejné materiálové vlastnosti a okrajové podmínky. Strop byl zatížen vodorovnou silou (viz obr. 1) a předpokládalo se ortotropní chování materiálu. Vzájemné spojení mezi trámy a záklopem bylo realizováno pomocí spojovacích elementů (hřebíků), které představovaly spolu s tloušťkou záklopu prvky s nastavitelnou tuhostí, což umožňovalo aktualizaci parametrů modelu.

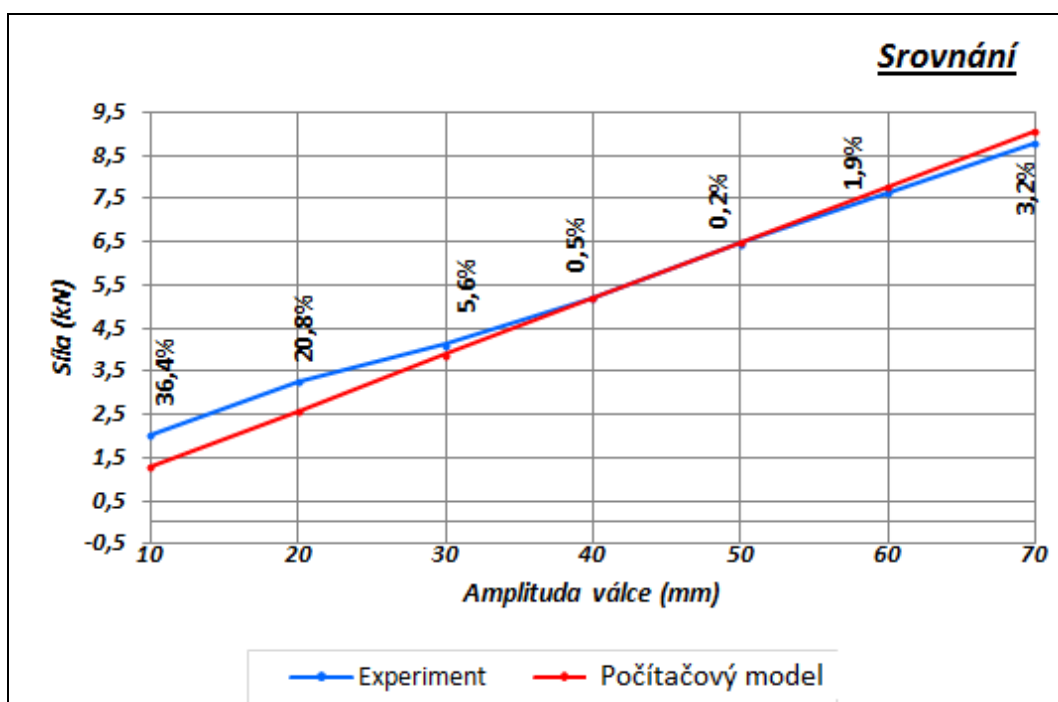
¹ Ing. Martin Wünsche, Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, v. v. i., Prosecká 76, 190 00 Praha 9, e-mail: wunsche@itam.cas.cz.



Obr. 1: Numerický model stropní konstrukce s detailním zobrazením spoje

2 TESTOVACÍ PROCEDURA

Počítačové simulaci předcházela experiment na konstrukci stropu se záklopem o tloušťce 25 mm, která byla výchozí pro určování parametrů modelu [1]. Porovnání je uvedeno na obrázku č. 2.



Obr. 2: Porovnání numerického modelu a experimentu se záklopem tloušťky 25 mm

Pro účely parametrizace byly brány v úvahu čtyři varianty tlouštěk bednění, a to konkrétně 14 mm, 20 mm, 25 mm, 30 mm [2].

Aby bylo možné definovat počítačový model s elastickým chováním, musely být stanoveny základní vlastnosti materiálu [3] a [4]. Pokud jde o dřevěné části stropu, byly použity empirické hodnoty pro smrkové dřevo, viz tab. 1. Tuhosti spojovacích elementů byly určeny v závislosti na experimentu. To se provedlo pomocí iteračního procesu, který spočíval v hledání shodného posunu

počítačového modelu a experimentu změnou parametru modulu pružnosti spojovacích elementů v počítačovém modelu. Vzhledem k nelineárnímu chování s hysterezním efektem, který byl pozorován u experimentu, bylo dosaženo určitého rozdílu ve výsledku, a to v důsledku linearity počítačového modelu. Rozdíl je patrný na obrázku číslo 1.

Tab. 1: Vlastnosti materiálů

Název	Modul pružnosti [Pa]
Spojovací elementy	1.5e11
Smrkové dřevo (ve směru vláken)	6.7e9
Smrkové dřevo (kolmo na vlákna)	0.33e9

Počítačové simulace byly provedeny v programu COMSOL MULTIPHYSICS 4.2a, kde probíhal výpočet podle základního vztahu (1):

$$-\nabla \cdot \sigma = F \quad (1)$$

kde:

∇ – diferenciální operator Nabla,

σ – tenzor napětí,

F – vektor zatížení.

Geometrie předpokládala počáteční mezeru mezi jednotlivými prvky, díky čemuž byl počítačový model složitý, pokud jde o specifikaci parametrů kontaktu. Kontaktní problémy jsou vysoce nelineární a jsou pro výpočetní techniku náročné [5]. V závislosti na materiálu, okrajových podmínkách, zatížení a dalších faktorech mohou přijít jednotlivé prvky do kontaktu a pak je jejich chování náhlé a nepředvídatelné. Pro řešení je zapotřebí použít Newtonovu-Raphsonovu iteraci, proto je v COMSOLu implementována rozšířená Lagrangeova metoda. Existují v zásadě dva přístupy pro řešení tohoto konstantního problému.

V prvním případě by musely být definovány kontakty mezi jednotlivými konstrukčními prvky, které jsou popsány dvěma rovnicemi, popisující okrajovou kontaktní plochu prvku a hlavní prvek, kde okrajové kontaktní plochy nemohou proniknout do hlavního prvku. Pokud okrajové kontaktní plochy pronikají do hlavního prvku, čili je iterace negativní, jsou prvky rozšířeny o Lagrangeovy multiplikátory pro tlak.

$$T_{np} = \begin{cases} T_n - p_n g & \text{když } g \leq 0 \\ T_n e^{-\frac{p_n g}{T_n}} & \text{ostatní} \end{cases} \quad (2)$$

kde:

g – hranice mezi okrajem a hlavním prvkem.

Pokud se bere v úvahu i tření, pak:

$$\mu = \begin{cases} \mu_d + (\mu_s - \mu_d) e^{-\text{dfric}|v_s|} & \text{dynamické tření} \\ \mu_s & \text{ostatní} \end{cases} \quad (3)$$

kde:

μ_s – součinitel statického tření,

μ_d – součinitel dynamického tření.

Ve druhém případě, který je typický pro program COMSOL MULTIPHYSICS od verze 4.2a, jsou již tyto kontaktní problémy řešeny úpravou sítě konečných prvků. Tato úprava vychází z deformace sítě, kdy pokud je konečný prvek deformován, jenž je popsán poměrem výšky a strany v určitém poměru, dojde k jeho překreslení. Tento poměr se pohybuje v rozmezí 0 až 1, přičemž hodnota 1 je pro poměr nejlepší hodnotou a 0 nejhorší hodnotou.

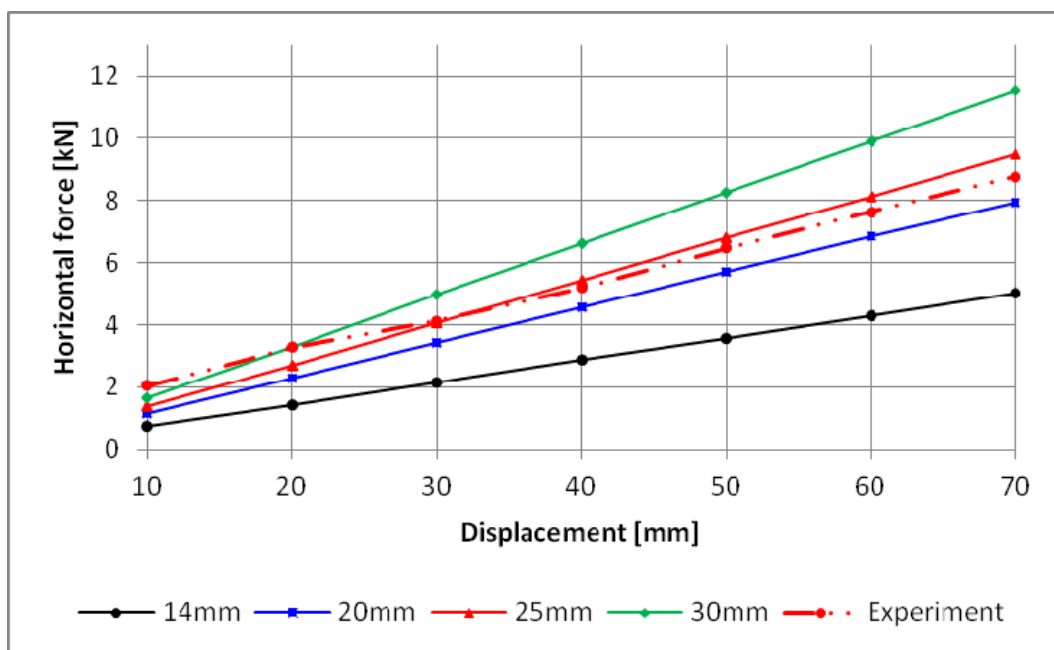
3 VÝSLEDKY

Řešení stropní konstrukce se předpokládalo ve dvou základních provedeních [2]. V prvním případě byl konstantní modul pružnosti spojovacích elementů, zatímco tloušťka záklopu byla proměnná. Ve druhém případě se zaměřovala na závislost tuhosti trámového stropu a na tuhosti spojovacích elementů s proměnným modulem pružnosti.

Tento počítačový model byl založen na lineární teorii pružnosti. Nebylo uvažováno žádné tření mezi prkny záklopu, stejně tak se nebralo v úvahu prolínání jednotlivých prken záklopu, což vyplynulo z povahy řešiče dané verze programu.

3.1 Konstantní tuhost spojovacích elementů

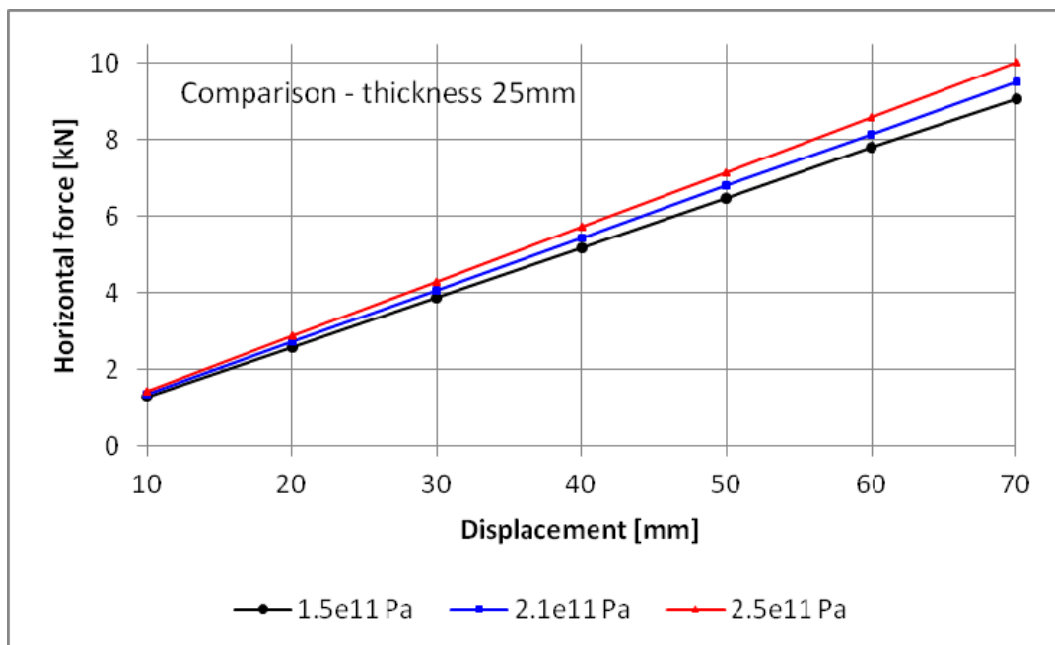
Výsledky získané změnou tloušťky bednění jsou uvedeny na obrázku 3. Obrázek ukazuje velikosti působící vodorovné síly, která stropní konstrukci posune pro příslušné tloušťky do požadované hodnoty.



Obr. 3: Průběh síly pro konstantní tuhost spojovacích elementů a proměnnou tloušťku záklopu

3.2 Konstantní tloušťka záklopu a proměnná tuhost spojovacích elementů

Tuhost spojovacích elementů je proměnná v závislosti na hodnotě modulu pružnosti ve třech modifikacích 1,5 e11, 2,1e11 a 2.5e11 Pa. Tloušťka bednění je konstantní s hodnotou 25 mm.



Obr. 4: Průběh síly pro konstantní tloušťku záklopu 25 mm a proměnnou tuhost spojovacích elementů

4 ZÁVĚR

Tato analýza byla zaměřena na parametrické hodnocení vlivu tloušťky záklopu na tuhost trámového stropu s jednovrstvým záklopem. Z výsledků vyplývá, že tloušťka záklopu má značný vliv na tuhost stropní konstrukce. To bylo prokázáno pomocí počítačových modelů, které uvažovaly čtyři druhy tloušťek. Před parametrickou analýzou byly materiálové charakteristiky modelů přizpůsobeny výsledkům experimentu tak, že model měl srovnatelné mechanické vlastnosti.

Počítačový model, který zde byl analyzován, je možné nazvat jako "slabý kinematický systém". Jeho smyková tuhost a nelinearita je zásadně ovlivněna mezerami mezi prkny.

Byly provedeny dvě modifikace stropní konstrukce: (i) konstantní modul pružnosti spojovacích elementů a (ii) konstantní tloušťka záklopu 25 mm. První z nich byla zaměřena na vliv tloušťky bednění při konstantní tuhosti spojovacích elementů. Navzdory tomu, že počítačový model je přísně lineární bez možnosti uplatnění tření, prokázal záklop s ohledem na tuhost vysokou účinnost. Výrazný nárůst tuhosti byl prokázán u všech variant tloušťek. Ve druhém nastavení, byla konstantní tloušťka záklopu a proměnná byla jen tuhost spojovacích elementů ve třech úrovních. Rovněž byl ověřen předpoklad, že celková tuhost stropní konstrukce roste s tuhostí spojovacích elementů.

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum byl proveden v rámci evropského projektu Niker (New Integrated Knowledge Based Approaches to the Protection of Cultural Heritage From Earthquake – Induced Risk, grand agreement no. 244123), který se zaměřuje chování historických konstrukcí na seizmicky aktivní oblastí. Výzkum se zaměřuje na chování zděných, stropních a střešních konstrukcí. Tímto bych chtěl poděkovat Ústavu teoretické a aplikované mechaniky AV ČR v.v.i. za poskytnutí potřebných materiálů pro zpracování tohoto článku.

LITERATURA

- [1] D5.4 2011: Report about the accuracy and reliability of the numerical simulations on floors and vaults; Deliverable 5.4, Project NIKER (Grand Agreement No.: 244123).
- [2] D5.5 2011: Parametric assessment and optimized design procedures for floors and vaults; Deliverable 5.4, Project NIKER (Grand Agreement No.: 244123).
- [3] Handbook 1, 2: Design of Timber Structures according to EC5 (2008); Educational Materials for Designing and Testing of Timber Structures - TEMTIS; Leonardo da Vinci Pilot Project (CZ/06/B/F/PP/168007).
- [4] EN 1995-1-1:2004. Eurocode 5 - Design of Timber Structures.
- [5] BROŽOVSKÝ J., MATERNA A.: Metoda konečných prvků ve stavební mechanice, Matematika pro inženýry 21. století, Ostrava 2011.

Oponentní posudek vypracoval:

Prof. Ing. Jiří Šejnoha, DrSc., Katedra stavební mechaniky, Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze.

Prof. Ing. Alois Materna, CSc., MBA, ČKAIT, Brno.